

# 位相限定相関法に基づく人体の画像計測とその応用に関する研究

著者	宮澤 一之
学位授与機関	Tohoku University
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/48187">http://hdl.handle.net/10097/48187</a>

## 第 6 章

# 結言

以上，第 2 章から第 5 章まで位相限定相関法に基づく人体の画像計測とその応用について述べた．

第 2 章では，人体の画像計測，特に本論文で扱う生体画像のマッチングについて基礎的考察を行った．本論文では，生体画像の照合としてバイオメトリクス認証，生体画像のレジストレーションとして人体形状計測を扱うため，ここでは，これら二つの異なる技術分野のそれぞれについて基礎的考察を行った．バイオメトリクス認証では，最も高信頼な認証が可能であるとされる虹彩認証について，虹彩の特徴と虹彩画像の取得方法を述べ，現在までに提案されている虹彩認証アルゴリズムとその問題点を示した．人体形状計測では，基本となる 3 次元計測技術を能動型計測と受動型計測に分けて述べ，現在までに実用化されている人体形状計測システムを取りあげることでその主流が能動型計測であることを示した．そして，能動型システムの問題点について述べ，本論文で着目するステレオビジョンに基づく受動型計測の原理と，本技術における画像レジストレーションの重要性について述べた．

第 3 章では，本論文における重要な基盤技術である位相限定相関法に基づく画像マッチングについて述べた．まず，本技術の基本となる位相限定相関関数（POC 関数）を定義し，二つの画像間で計算される POC 関数から画像間の類似度とサブピクセル精度の移動量を推定できることを示した．そして，POC 関数を用いた生体画像のマッチングの際に重要となる高精度化手法として，窓関数の適用，スペクトルの重み付け，帯域制限，相関ピークモデルのフィッ

ティング、複数の POC 関数の集約について述べた。

第 4 章では、生体画像の照合としてバイオメトリクス認証に着目し、最も高信頼な認証が可能であるとされる虹彩認証への位相限定相関法の応用について述べた。まず、カメラから取得した虹彩画像を照合に適した形へ変換する前処理について述べ、前処理を施した虹彩画像の周波数特性を解析することで、虹彩パターンの重要な情報がある特定の周波数帯に集中していることを示した。そして、このような画像の照合に有効である帯域制限位相限定相関関数 (BLPOC 関数) を虹彩認証に特化させることで、通常の POC 関数を利用した場合に比べて虹彩画像の照合性能を向上できることを示した。提案手法では、虹彩画像から直接的に BLPOC 関数を計算して認証を行うため、コード化を行う従来手法に比べて虹彩パターンの情報をより多く認証に利用することができ、また、従来手法で必要とされていた複雑なパラメータ最適化も簡略化することができる。虹彩画像データベースを用いた実験では、提案手法は従来手法に比べて大幅に高い認証性能を示し、また、世界的な虹彩認証アルゴリズム性能評価プロジェクトと同条件の実験において世界最高水準の性能を示した。さらに本論文では、従来システムに比べて小型・低コストな虹彩認証システムを開発し、提案手法を実装することでその実用性を確認した。開発したシステムでは、DFT などの計算に特化した DSP を利用することで、約 1 秒での認証を実現している。また、このような認証システムを実際に利用するうえで問題となる恐れのある虹彩データの容量について、虹彩画像の量子化した位相スペクトルである 2D FPC を登録データとすることを提案し、認証性能の大きな低下を伴わずにデータ容量を削減する手法を示した。

第 5 章では、生体画像のレジストレーションとして生体画像の対応付けに着目し、ステレオビジョンに基づく受動型人体形状計測への位相限定相関法の応用について述べた。まず、ステレオビジョンにおける 3 次元計測で必須となるステレオ画像の対応付けについて、2 次元画像のマッチングから 1 次元信号のマッチングへと変換できることを示し、これに特化した 1 次元 POC 関数に基づくサブピクセルステレオ対応付け手法について述べた。そして、詳細な実験を通して 1 次元 POC 関数に基づく対応付け手法が従来手法に比べて高い性能を持つことを確認し、カメラから 1 m 程度の位置にある対象物体の形状を誤差 1 mm 以下で計測できることを示した。そして、本技術に基づき、ステレオカメラとロボットアームを組み合わせた受動型

人体形状計測システムを開発し、実際に人体全身の3次元計測を行った。本システムは、一つのスレオカメラを利用した移動撮影によって多視点から人体のスレオ画像を取得し、各視点で復元される3次元データを一つに統合することで全身のデータを得る。計測精度評価実験において、本システムは従来の能動型計測システムに匹敵する計測精度を示し、その高い有効性が確認された。本論文では、この受動型人体形状計測技術を特に医療分野へと展開することで、さらなる有効性の実証を行った。具体的には、3次元医用データとカメラ画像の融合、浮腫治療の効果計測に人体形状計測技術を取り入れ、新たな可能性の開拓および従来技術の問題解決を図った。3次元医用データとカメラ画像の融合では、形状計測により得られる画像と3次元データを利用することで、通常の医用データのみでは不可能な極めてリアリティの高い人体モデルを生成する手法を提案した。さらに、一般的な医用画像ビューアのプラグインを開発することで提案手法による医用データとカメラ画像の融合表示を実現し、実際に脳外科手術シミュレーションに応用することでその有効性を確認した。浮腫治療の効果計測では、ロボットアームを用いた人体形状計測システムをシミュレーションプラットフォームとして利用し、下肢形状の計測に特化したさらに簡便なシステムを開発した。開発した受動型下肢形状計測システムを実際に病院に設置することで浮腫患者の下肢形状計測を行い、これまで手動で行われていた浮腫治療の効果計測を大幅に高精度化、効率化できることを示した。

以上、本論文では、人体の画像計測、特に生体画像のマッチングに着目し、照合とレジストレーションの双方の目的に対して位相限定相関法に基づく体系的な技術開発を行い、応用を通してその有効性を実証した。生体画像の照合では、虹彩認証へ位相限定相関法を適用し、従来手法に比べて大幅に高い認証性能を実現した。生体画像のレジストレーションでは、受動型人体形状計測へ位相限定相関法を適用し、能動型計測システムに匹敵する精度を持つ受動型人体形状計測システムを開発した。今後、本論文における人体の画像計測技術をさらに発展させるために取り組むべき課題として、完全な非拘束環境での計測や、非剛体な運動への対応があげられる。具体例として、生体画像の照合では、離れた位置からの（利用者に意識させない）個人認証や極端な劣化を伴う画像からの個人識別、生体画像のレジストレーションでは、運動解析やジェスチャ認識、医用画像解析などが考えられよう。



## 付録 A

# 位相限定相関法に基づくボリウムデータの位置合わせ

### A.1 まえがき

5.4.1 に述べたように，CT や MRI などの断層撮影装置から得られる断層画像群を積層することで，人体内部の 3 次元構造をボリウムデータとして可視化することが可能である．これらの有効性は臨床において広く知られており，CT や MRI を用いた画像診断が一般に普及しつつある．ボリウムデータを利用した画像診断において，複数のボリウムデータの比較や合成は最も重要な診断手段の一つである．例えば，異なる時間に撮影された病変部位を観察することは病状の進行や解剖学的な変化の理解に不可欠であり，また，撮像に優れる部位が異なる複数の撮影装置<sup>\*1</sup>から得られたボリウムデータや異なる撮影方法で取得されたボリウムデータを合成（フュージョン）することで，画像診断の大幅な信頼性向上が期待できる．しかし，撮影時間の異なる複数のボリウムデータの間には，一般に未知の位置ずれやひずみが含まれており，正確な比較や合成を行うためには，ボリウムデータの位置合わせが必要不可欠となる．

ボリウムデータの位置合わせは，その重要性から活発な研究が進められており，それに

---

<sup>\*1</sup> 例えば CT は骨などの硬組織の撮像に優れ，MRI は臓器などの軟組織の撮像に優れる．

伴って多くの手法が提案されている．これらの位置合わせ手法は，ランドマークベース [128]，幾何学的形状ベース [96]，ボクセル類似度ベース [129]–[132] の三つに大きく分けることができる．ランドマークベースの手法は，埋め込み型マーカなどの位置情報を用いてレジストレーションを行う．アルゴリズムの簡便性に優れるものの，撮影時に侵襲的なマーカが必要であるという問題がある．幾何学的形状ベースの手法としては，5.3.4 に述べた ICP アルゴリズムに基づく手法が広く知られている．この手法では，まず与えられた二つのボリュームデータから皮膚や臓器表面などの同一部位をサーフェスデータとして抽出し，それらの間で ICP アルゴリズムによる位置合わせを行う．しかし，特に二つのボリュームデータが異なる撮影装置から得られている場合<sup>\*2</sup>など，両者から全く同じ組織をサーフェスとして抽出することは困難であることが多い．ボクセル類似度ベースの手法は，ボリュームデータ間に類似度を定義し，これを最大化するような位置合わせパラメータを非線形最適化によって決定する．現在最も広く利用されている手法であり，特に正規化相互情報量 (Normalized Mutual Information: NMI) を類似度として利用する Studholme らによる手法 [130] がよく知られている．この手法は，マルチモーダルレジストレーションにも適用可能であるが，非線形最適化における計算コストの高さが問題となっており，また，適切な初期値を与えないと正しい解に収束しない．特に，変形の自由度が非常に高い非剛体位置合わせにおいては，数千もの変数を含む非線形最適化問題を解く必要があり，現実的な計算時間で位置合わせを行うために自由度を減らし変形に制約を設けている場合が多い [131]．

こういった問題を解決するため，ここでは，位相限定相関法を用いたボリュームデータの対応付けによって位置合わせを行うアルゴリズムを提案する [117], [118]．第 3 章から第 5 章まで，1 次元および 2 次元 POC 関数を用いることで非常に高精度に信号間のマッチングが可能であることを述べた．ここでは，さらに POC 関数を 3 次元に拡張することでボリュームデータのマッチングを行う．3 次元 POC 関数を用いることで，1 次元波形や 2 次元画像の場合と同様にサンプリング分解能を超える精度，つまりサブボクセル精度でボリュームデータ間の位置ずれ量を求めることが可能となる．提案する位置合わせ手法では，3 次元 POC 関数を用い

---

<sup>\*2</sup> 異なる二つの撮影装置あるいは撮影方法により得られたデータを位置合わせすることを特にマルチモーダルレジストレーションと呼ぶ．

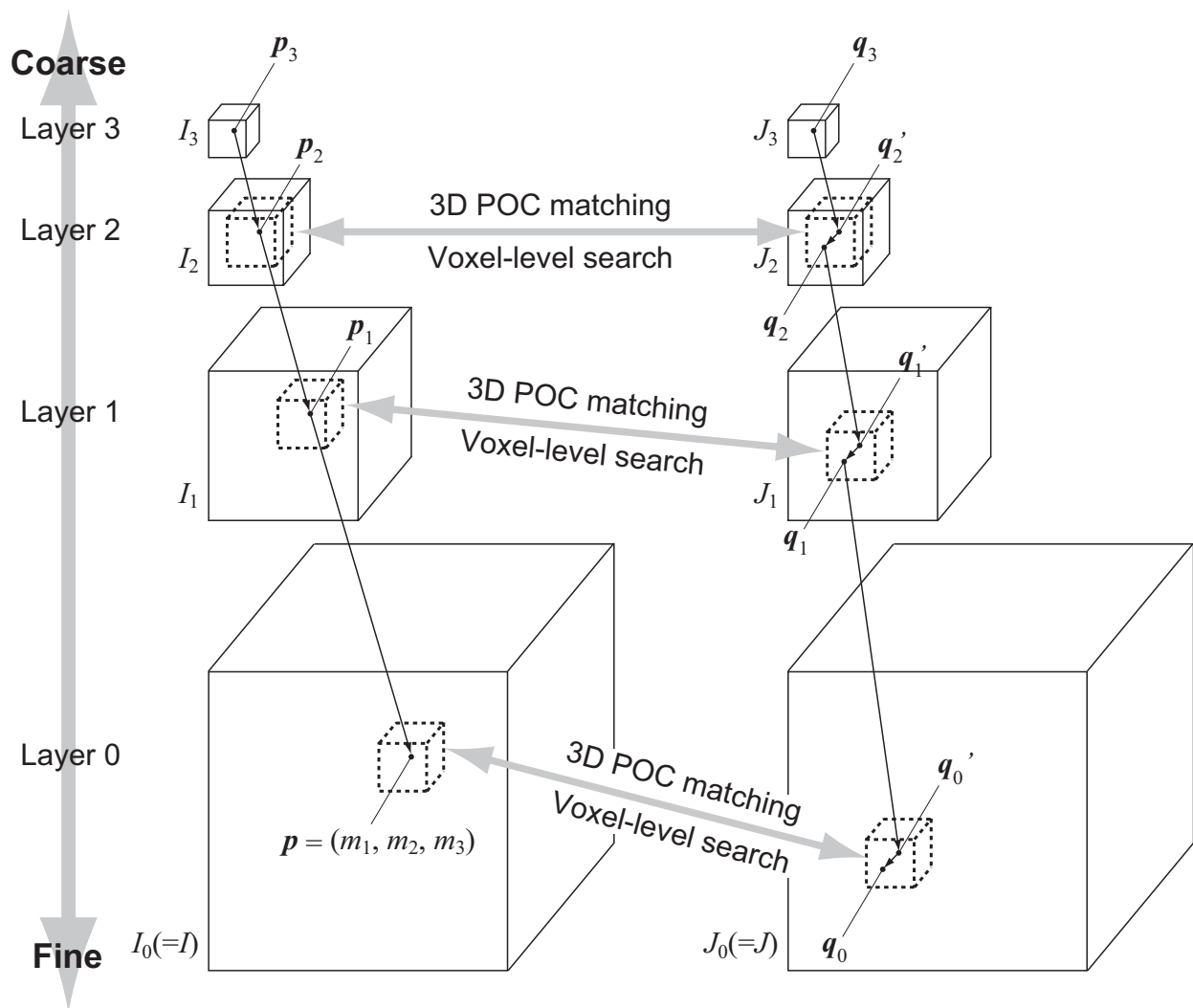
た 3 次元ブロックマッチングによってボリウムデータ間の対応付けを行い，得られた対応関係から剛体変換パラメータの推定を行う．サブボクセル精度の対応付けにより高精度な位置合わせが可能だけでなく，従来手法のような非線形最適化を必要としないため計算時間を大幅に短縮することができる．また，非線形最適化を行う際に必要となる初期値の推定も必要ない．さらに，剛体変換のみでなく非剛体変換への拡張も容易であり，ここでは，Free-Form Deformation (FFD) [133] を用いた非剛体位置合わせへの拡張についても述べる．実験では，実際に異なるタイミングで取得された CT データおよび MRI データを利用し，これらの位置合わせを行うことで撮影装置が同一の場合と異なる場合の両方について提案手法の有効性を示す．

## A.2 3次元 POC 関数を用いたボリウムデータの対応付け

第 3 章に述べた 2 次元 POC 関数および各種の高精度化手法は，2 次元から 3 次元への変更を行うだけでそのまま 3 次元ボリウムデータに適用することができる．また，5.2.3 に述べたステレオ画像の対応付けと同様に，粗密探索と局所的なブロックマッチングを組み合わせることで，高精度なボリウムデータの対応付けが可能となる．つまり，与えられたボリウムデータの解像度を段階的に下げることでボリウムピラミッドを構成し，解像度を下げた上位層からマッチングを開始して下位層へと移動していく．各層では，基準点と対応候補点を中心としてそれぞれ切り出した 3 次元ブロック間で 3 次元 POC 関数による位置ずれ量の推定が行われる．図 A.1 にこの様子を示す．図 A.1 における  $p = (m_1, m_2, m_3) (\in \mathbb{Z}^3)$  は，基準となるボリウムデータ  $I$  上の基準点の座標ベクトルであり， $\mathbb{Z}$  は整数全体の集合を指す．ボリウムデータの対応付けでは，もう一方のボリウムデータ  $J$  上で  $p$  の対応点  $q(p) = (n_1, n_2, n_3) (\in \mathbb{R}^3)$  を求める．ただし， $\mathbb{R}$  は実数全体の集合であり， $q(p)$  がサブボクセル精度であることを示している．以降では，簡単のため，基準ボリウムデータ  $I$  における整数座標ベクトルの集合を  $C_I^{int} (\in \mathbb{Z}^3)$  で表し，ボリウムデータ  $J$  における実数座標ベクトルの集合を  $C_J^{real} (\in \mathbb{R}^3)$  で表す．つまり， $I$  と  $J$  の対応付けとは，全ての基準点  $p \in C_I^{int}$  について対応点  $q(p) \in C_J^{real}$  を求める問題である．以下では，3 次元 POC 関数を用いたボ



## 1. Voxel-level search



## 2. Sub-voxel search

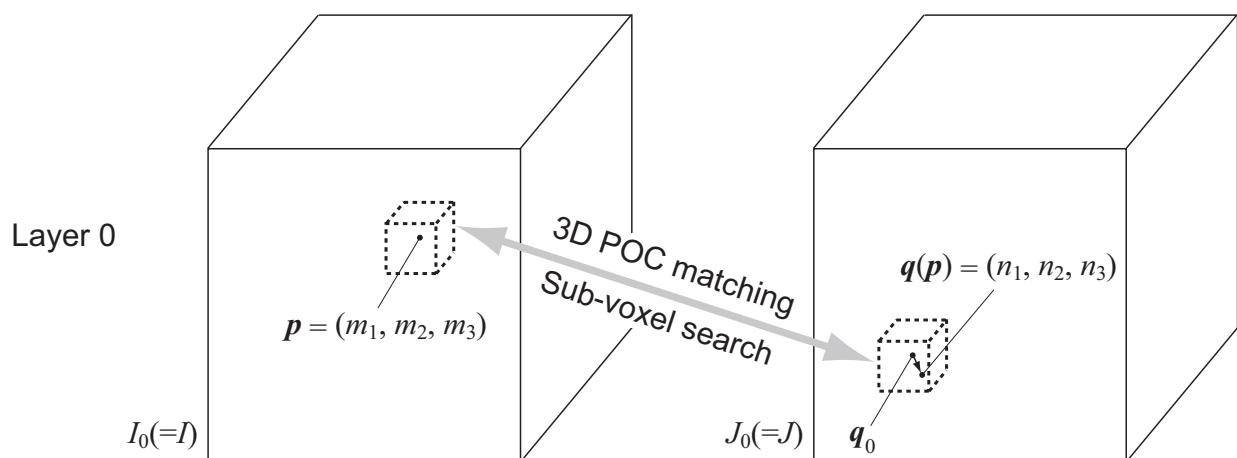


図 A.1 ボリュームピラミッドを用いた粗密探索 ( $l_{max} = 3$ )

リウムデータの対応付け手法の詳細な手順について述べる．

ボリウムデータのサブピクセル対応付け手法

入力：

- ボリウムデータ  $I$  および  $J$
- 基準点  $p = (m_1, m_2, m_3) \in C_I^{int}$

出力：

- 全ての基準点  $p = (m_1, m_2, m_3) \in C_I^{int}$  に対する対応点  $q(p) = (n_1, n_2, n_3) \in C_J^{real}$

処理手順：

[ボリウムピラミッドの生成]

Step 1：まず，ボリウムピラミッドの最下位層（階層 0）におけるボリウムデータを  $I_0 = I$  および  $J_0 = J$  とする．次に， $l = 1, 2, \dots, l_{max}$  のそれぞれについて  $I_0$  および  $J_0$  を  $1/2^l$  倍に縮小し，階層  $l$  におけるボリウムデータ  $I_l$  および  $J_l$  を生成する．なお，ここでは， $I_{l-1}$  の隣接した 8 ボクセルに対する平均値を  $I_l$  の 1 ボクセルとすることでボリウムデータの縮小を行う．

全ての基準点  $p = (m_1, m_2, m_3) \in C_I^{int}$  について，以下の [ボクセルレベルでの対応付け] と [サブボクセルレベルでの対応付け] を行う．

[ボクセルレベルでの対応付け]

Step 2：最上位層  $l_{max}$  において，基準点  $p = (m_1, m_2, m_3)$  に対応する点  $p_{l_{max}}$  は次式で与えられる．

$$p_{l_{max}} = (\lfloor 2^{-l_{max}} m_1 \rfloor, \lfloor 2^{-l_{max}} m_2 \rfloor, \lfloor 2^{-l_{max}} m_3 \rfloor) \quad (A.1)$$

なおここでは，最上位層において基準点と対応点が同じ座標を持つと仮定し，階層  $l_{max}$  における対応点の初期値として  $q_{l_{max}} = p_{l_{max}}$  を与える．ここで， $l = l_{max} - 1$  とする．

Step 3：階層  $l$  において，基準点  $p = (m_1, m_2, m_3)$  に対応するボリウムデータ  $I_l$  上の点  $p_l$  は次式で与えられる．

$$p_l = (\lfloor 2^{-l} m_1 \rfloor, \lfloor 2^{-l} m_2 \rfloor, \lfloor 2^{-l} m_3 \rfloor) \quad (A.2)$$

一方，ボリウムデータ  $J_l$  における対応点の初期値  $q'_l$  は，上位層  $l + 1$  で推定された対応点

$q_{l+1}$  から次式により求められる．

$$q'_l = 2q_{l+1} \quad (\text{A.3})$$

そして， $p_l$  および  $q'_l$  を中心とするブロックを  $I_l$  および  $J_l$  から切り出し，二つのブロック間で 3 次元 POC 関数を用いてボクセルレベルの位置ずれ量を推定する．推定された位置ずれ量を  $\delta_l$  とすると，階層  $l$  における対応点  $q_l$  は次式で与えられる．

$$q_l = q'_l + \delta_l \quad (\text{A.4})$$

Step 4 :  $l = l - 1$  として下位層に移動し， $l \geq 0$  である限り Step 3 と Step 4 を繰り返す．

[サブボクセルレベルでの対応付け]

Step 5 : 最下位層でのボリウムデータ  $I_0$  および  $J_0$  (元のボリウムデータ) において，それぞれ  $p$  および  $q_0$  を中心とするブロックを切り出す．そして，二つのブロック間で 3 次元 POC 関数を用いてサブボクセルレベルの位置ずれ量を推定する．サブボクセルレベルの位置ずれ量を  $\delta$  とすると，最終的な対応点  $q(p)$  は次式で与えられる．

$$q(p) = q_0 + \delta \quad (\text{A.5})$$

## A.3 剛体位置合わせ

3 次元 POC 関数を用いたボリウムデータの対応付けによりボリウムデータ間の対応関係が既知となれば，5.3.4 に述べた手法によって剛体変換パラメータ（回転行列および並進ベクトル）を推定することができる．ここで，位置合わせ精度を向上させるための手法として，以下のようなものが考えられる．

### A.3.1 基準点の選別

位相限定相関法を用いることで，異なる撮影装置から得られたボリウムデータや異なる撮影方法により得られたボリウムデータの間でもロバストな対応付けが可能となる．しかし，例えば撮影装置が異なる場合，部位によっては両者のコントラストが大きく変化し，これによ

り位相情報が全く異なってしまう場合がある．このような箇所に基準点を設けてしまうと，正しく対応点を求めることができず誤対応となり，対応関係から剛体変換パラメータを推定する際にノイズとなる．そこで，基準となるボリュームデータにおいて単純な格子状に基準点を設けるのではなく，両方で位相情報が共通となる箇所に限定して基準点を配置することで誤対応を削減することが可能である．例えば CT と MRI から得られるボリュームデータにおいて，位相情報が共通となるような部位としては骨や皮膚などがあげられるが，剛体位置合わせにおいては運動が剛体変換で記述しやすい硬組織周辺を利用することが望ましい．そこで提案手法では，CT データにおいて骨に相当するボクセル ( $CT \text{ 値} \geq 400$ ) のみに基準点を配置し，対応点探索を行う．なお，本手法は非剛体位置合わせにおいても効果的であり，非剛体位置合わせの場合は骨に加えて皮膚周辺 ( $CT \text{ 値} -100 \sim 0$ ) にも基準点を配置する．

### A.3.2 ロバスト推定の利用

上記の基準点選別を行ったとしても対応関係には誤対応が含まれるため，対応点探索によって得られた対応ペアを全て用いて最小 2 乗法により剛体変換パラメータを推定しても高精度な位置合わせを行うことができない場合が多い．POC 関数のピーク値は対応付けの信頼性評価に有用であり，これに閾値を設けることで誤対応を減らすことができるが，それでも全ての誤対応を除去することはできない．そのため，提案手法では，データに外れ点が含まれていても信頼性の高いパラメータ推定が可能であるロバスト推定を用いる．ロバスト推定としては，RANSAC (RANdom SAmple Consensus)，M 推定，LMedS (Least Median of Squares) などが知られているが，ここでは，最も広く利用されている RANSAC を用いる [71], [126]．

### A.3.3 反復推定

ボリュームデータ間に大きな回転などが含まれている場合，1 回の対応点探索および位置合わせパラメータの推定だけでは十分な精度を達成することは難しい．このような場合，5.3.4 に述べた ICP アルゴリズムのように，対応付けとパラメータの推定，およびデータの移動を繰り返すことが効果的である．例えば，ボリュームデータ間で相対的に 1 方向に  $20^\circ$  程度の回

転が生じていても，約 10 回の反復推定で位置合わせ誤差が収束し，高精度な位置合わせが可能となることを確認している．

## A.4 非剛体位置合わせ

心臓や肺といった臓器，関節・筋肉などの軟組織の運動は，剛体変換では記述できない場合が多く，高精度な位置合わせのためには非剛体位置合わせが必要となる．具体的には，まず剛体位置合わせによってボリウムデータ間の大まかな位置合わせを行った後，非剛体位置合わせによって局所的な変形を補正する．非剛体変換は非常に多くの自由度を持つため，従来の非線形最適化によるパラメータ推定法ではきわめて多くの計算時間を要していた．これに対し，提案手法によって求められるボリウムデータ間の対応関係を利用すれば，従来手法に比べて大幅に高速な非剛体位置合わせが可能となる．以下では，B-スプライン補間に基づく FFD を利用した非剛体変換について述べる [133]．

この手法では，ボリウムデータ内に格子状に制御点が配置され，この制御点の移動がボリウムデータの変形を決定付ける． $x, y, z$  方向にそれぞれ  $\delta_x, \delta_y, \delta_z$  の間隔で格子状の制御点  $\phi_{i,j,k}$  が並ぶとき，任意の座標  $\mathbf{x} = (x, y, z)$  における移動ベクトル  $\mathbf{T}(\mathbf{x})$  は，3 次の B-スプラインを用いると次のように表される．

$$\mathbf{T}(\mathbf{x}) = \sum_{l=0}^3 \sum_{m=0}^3 \sum_{n=0}^3 B_l(u) B_m(v) B_n(w) \mathbf{T}(\phi_{i+l, j+m, k+n}) \quad (\text{A.6})$$

ただし  $i = \lfloor x/\delta_x \rfloor - 1$ ,  $j = \lfloor y/\delta_y \rfloor - 1$ ,  $k = \lfloor z/\delta_z \rfloor - 1$ ,  $u = x/\delta_x - \lfloor x/\delta_x \rfloor$ ,  $v = y/\delta_y - \lfloor y/\delta_y \rfloor$ ,  $w = z/\delta_z - \lfloor z/\delta_z \rfloor$  である．また， $B_l$  は， $l$  次の B-スプライン基底関数を表し，次式で定義される．

$$B_0(u) = (1 - u)^3/6 \quad (\text{A.7})$$

$$B_1(u) = (3u^3 - 6u^2 + 4)/6 \quad (\text{A.8})$$

$$B_2(u) = (-3u^3 + 3u^2 + 3u + 1)/6 \quad (\text{A.9})$$

$$B_3(u) = u^3/6 \quad (\text{A.10})$$

移動ベクトル  $\mathbf{T}(\mathbf{x})$  を用いて， $\mathbf{x}$  の移動後の座標  $\mathbf{x}'$  は次式で表される．

$$\mathbf{x}' = \mathbf{x} + \mathbf{T}(\mathbf{x}) \quad (\text{A.11})$$

ここで、二つのボリュームデータ間で基準点と対応点のペアが格子状に得られている場合、基準点を制御点とすれば、その移動ベクトルが基準点と対応点の座標の差分として容易に得られ、各ボクセルの移動ベクトルは式 (A.6) から計算することができる。しかし、実際には対応ペアが格子状に求められることは少ないため、マルチレベル B-スプラインを利用して FFD を計算する。マルチレベル B-スプラインは、不規則に並んだ制御点から各点の移動ベクトルを高速に計算するアルゴリズムであり、その詳細については文献 [134], [135] を参照されたい。

## A.5 実験と考察

提案するボリュームデータの対応付けに基づく位置合わせ手法の精度評価を行う。ここでは、同種の撮影装置・方法で得られたボリュームデータの位置合わせとして CT データと CT データの剛体位置合わせを行い、異なる撮影装置から得られたボリュームデータの位置合わせとして CT データと MRI データの剛体位置合わせを行う。どちらの場合も同一人物から異なるタイミングで取得された二つのボリュームデータ ( $512 \times 512 \times 512$  ボクセル) を 1 セットとし、これを 3 セット用いて実験を行った。CT データ同士の位置合わせには、デンタル CT から得られた顎部データを利用し、CT データと MRI データの位置合わせには、頭部データを利用した。

各セットの二つのボリュームデータの間には未知の位置ずれが含まれており、位置合わせを行ったとしても真値が未知であるためそのままでは精度評価を行うことができない。そこで、二つのボリュームデータのうち片方をロール、ピッチ、ヨー<sup>\*3</sup>でそれぞれ  $-30^\circ$  から  $30^\circ$  まで  $10^\circ$  ずつ回転させ、もう一方のデータと位置合わせを行った。このとき位置合わせによって推定される二つのボリュームデータ間の相対的なロール、ピッチ、ヨーの値は、最初からデータ間に存在していた位置ずれの影響を受けて必ずしも与えた回転角度と一致しない。しかし、与える回転角度を線形に変化させているため、推定される回転角度も必ず線形に変化するはずである。つまり、推定される回転角度の変化の線形性を調べることで、位置合わせ精度を評価す

---

<sup>\*3</sup> 3 次元空間の回転を表す。まず、 $z$  軸回りに回転させ (ロール)、次に新しい  $y$  軸回りに回転させ (ピッチ)、最後に新しい  $x$  軸回りに回転させる (ヨー)。

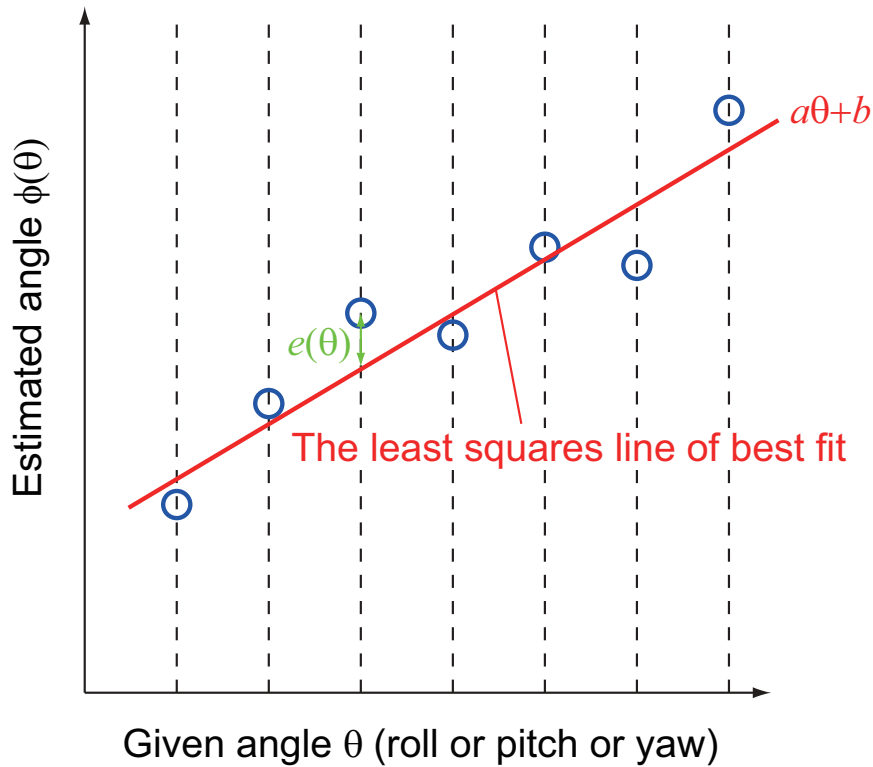


図 A.2 位置合わせ精度の評価方法

ることが可能である．そこで，本実験では， $-30^\circ$  から  $30^\circ$  まで  $10^\circ$  ずつ回転させたデータのそれぞれと剛体位置合わせを行うことで推定される角度に対して直線の方程式を最小 2 乗法により当てはめ，その当てはめ誤差を位置合わせ精度の指標として用いる．なお，位置合わせによって得られるのは回転行列と並進ベクトルであるため，この回転行列からロール，ピッチ，ヨーの値を分離して評価に用いる．精度評価の様子を図 A.2 に示す．図 A.2 では，ボリュームデータに与える回転角度を  $\theta$ （本実験では，ロール，ピッチ，ヨー全てに同じ値を与える），位置合わせにより推定される角度を  $\phi(\theta)$ ，当てはめられた直線の方程式を  $a\theta + b$  としている．このとき，当てはめ誤差  $e(\theta)$  は，次式で与えられる．

$$e(\theta) = \phi(\theta) - (a\theta + b) \quad (\text{A.12})$$

なお，本実験では，線形性の指標として次式で表す  $e(\theta)$  の RMS (Root Mean Square) を利用

する．

$$e_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N_\theta} \sum_{\theta=\theta_{min}}^{\theta_{max}} e(\theta)^2} \quad (\text{A.13})$$

ただし，本実験では上式において  $\theta_{min} = -30$ ， $\theta_{max} = 30$  であり， $\theta$  を  $10^\circ$  きざみに変化させたため  $N_\theta = 7$  である．

本実験では，従来手法との比較のため，現在最も広く用いられている正規化相互情報量 (NMI) に基づくボリュームデータの位置合わせ手法 [130] を実装し，同様の実験を行う．この手法では，二つのボリュームデータ間の類似度として NMI を計算し，NMI が最大となるような位置合わせパラメータを非線形最適化によって決定する．なお，ここでは非線形最適化手法として BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) 法を利用している．

実験に利用した三つのボリュームデータセットのうち，代表として一つのセットについて，与えた回転角度と推定された回転角度の関係を図 A.3，A.4 に示す．図 A.3 は CT データと CT データの位置合わせ結果であり，図 A.4 は CT データと MRI データの位置合わせ結果である．これらを見ると，どちらの場合も位相限定相関法に基づく提案手法では推定角度が線形に変化しているのに対し，NMI に基づく従来手法では角度変化にばらつきが見られる．角度変化の線形性は位置合わせ精度を直接的に表すため，提案手法は従来手法に比べて高い位置合わせ精度を実現していると言える．与える角度が  $0^\circ$  に近い場合は従来手法でも推定角度が線形的なふるまいを示すが，角度が大きくなると位置合わせに失敗していることがわかる．本実験では，従来手法における最適化計算で必要となる回転角度の初期値は全て  $0^\circ$  としたため，与える角度が  $0^\circ$  から大きく離れると最適化計算において正しい解に収束しにくくなるのがこの原因としてあげられる．より適切な初期値を与えれば位置合わせ精度が向上すると考えられるが，初期値推定のための新たなアルゴリズムを導入しなければならない．また，表 A.1，A.2 は，全てのデータセットについて式 (A.13) に示した RMS 誤差を計算した結果である．表 A.1 は CT データ同士の位置合わせ結果であり，表 A.2 は CT データと MRI データの位置合わせ結果である．これらを見ると，全ての場合において提案手法は従来手法よりも大幅に小さな RMS 誤差を示しており，高い位置合わせ精度を達成していることがわかる．ロール，ピッチ，ヨーおよび全てのデータセットについて RMS 誤差の平均値を求めると，CT デー



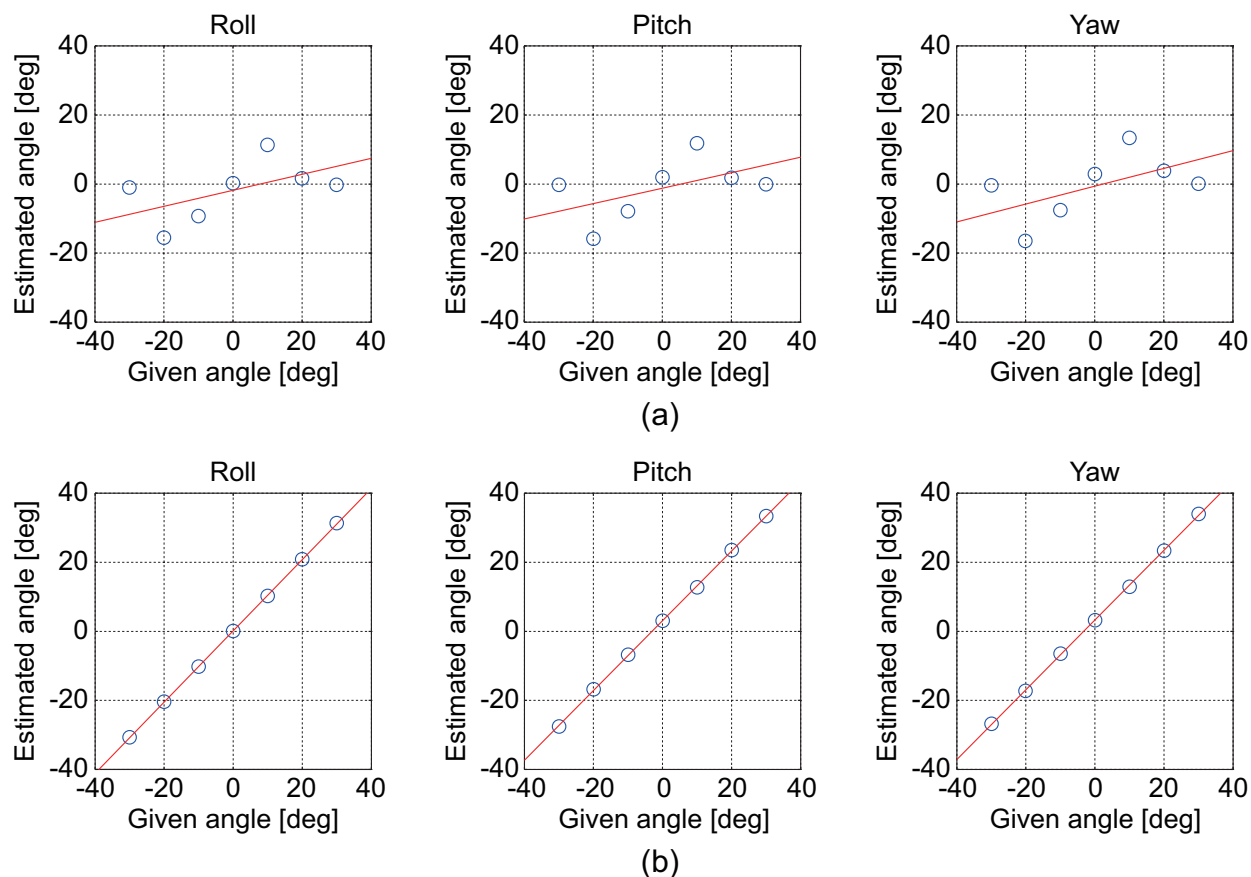


図 A.3 CT データと CT データの位置合わせ結果 : (a) NMI , (b) POC

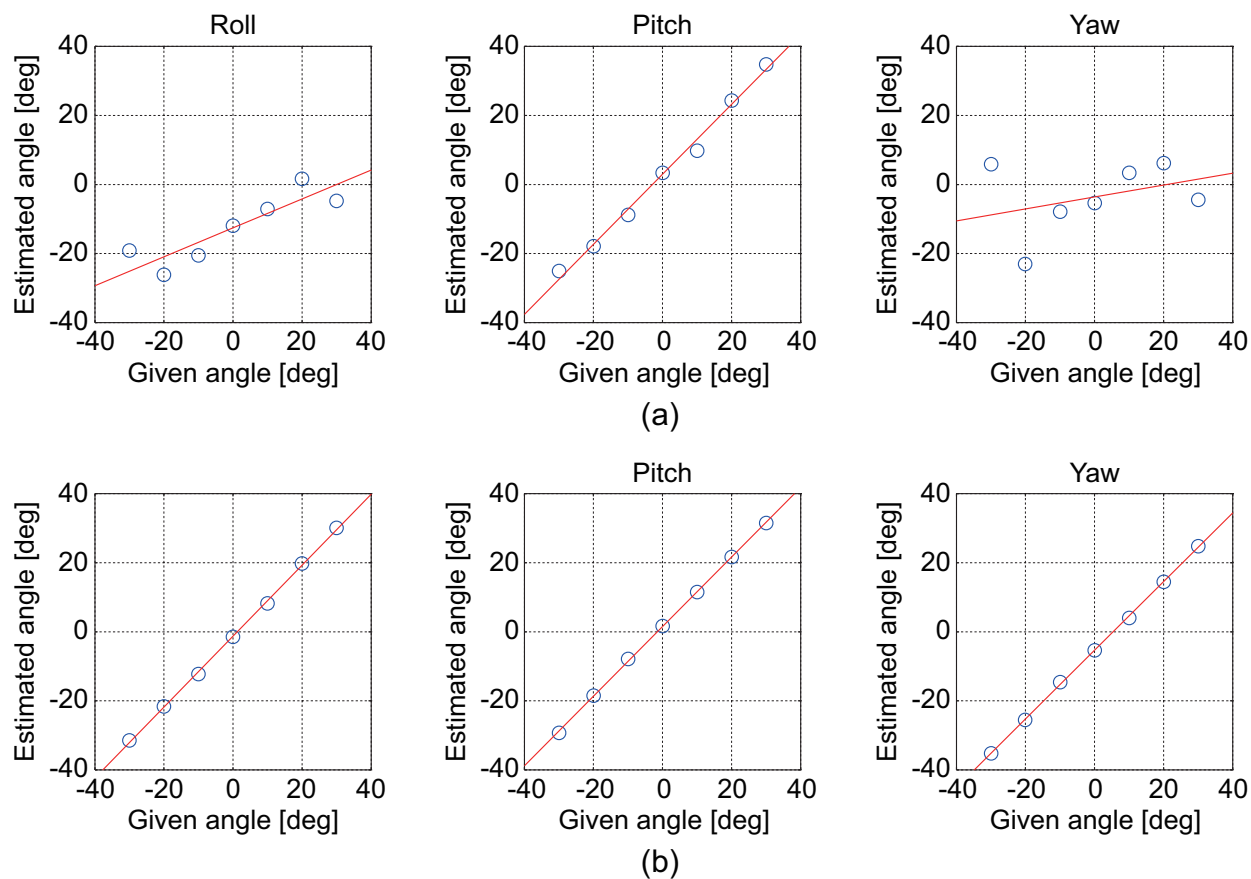


図 A.4 CT データと MRI データの位置合わせ結果 : (a) NMI , (b) POC

表 A.1 CT データと CT データの位置合わせにおける RMS 誤差 [degree]

	セット 1			セット 2			セット 3		
	ロール	ピッチ	ヨー	ロール	ピッチ	ヨー	ロール	ピッチ	ヨー
NMI	6.7791	6.9533	7.4983	3.3640	6.8248	4.4594	5.0914	5.3801	5.7408
POC	0.1243	0.2576	0.3253	0.5317	1.2182	2.3531	0.1781	0.4653	0.7134

表 A.2 CT データと MRI データの位置合わせにおける RMS 誤差 [degree]

	セット 1			セット 2			セット 3		
	ロール	ピッチ	ヨー	ロール	ピッチ	ヨー	ロール	ピッチ	ヨー
NMI	4.2335	5.1519	4.2931	5.0495	8.6359	5.3190	4.4480	1.8106	9.1547
POC	0.4322	0.4607	0.5144	0.2088	0.4975	0.5931	0.5336	0.3230	0.3713

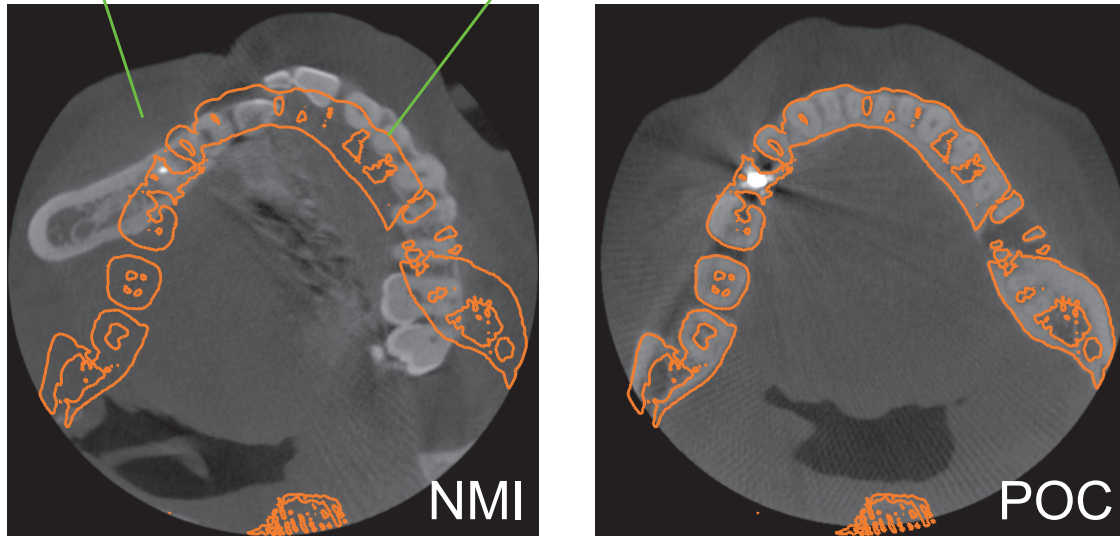
表 A.3 位置合わせに要した時間の平均値 [minute]

	CT データと CT データ			CT データと MRI データ		
	セット 1	セット 2	セット 3	セット 1	セット 2	セット 3
NMI	145.1829	148.3986	139.4686	168.5386	169.9514	168.0886
POC	7.6573	15.6886	6.8795	16.6255	10.4624	27.4321

タ同士の位置合わせの場合，従来手法が  $5.7879^\circ$ ，提案手法が  $0.6852^\circ$  となり，CT データと MRI データの位置合わせの場合，従来手法が  $5.3440^\circ$ ，提案手法が  $0.4372^\circ$  となった．どちらの場合も，提案手法により  $1^\circ$  以下の精度で回転角度が推定可能であることがわかる．

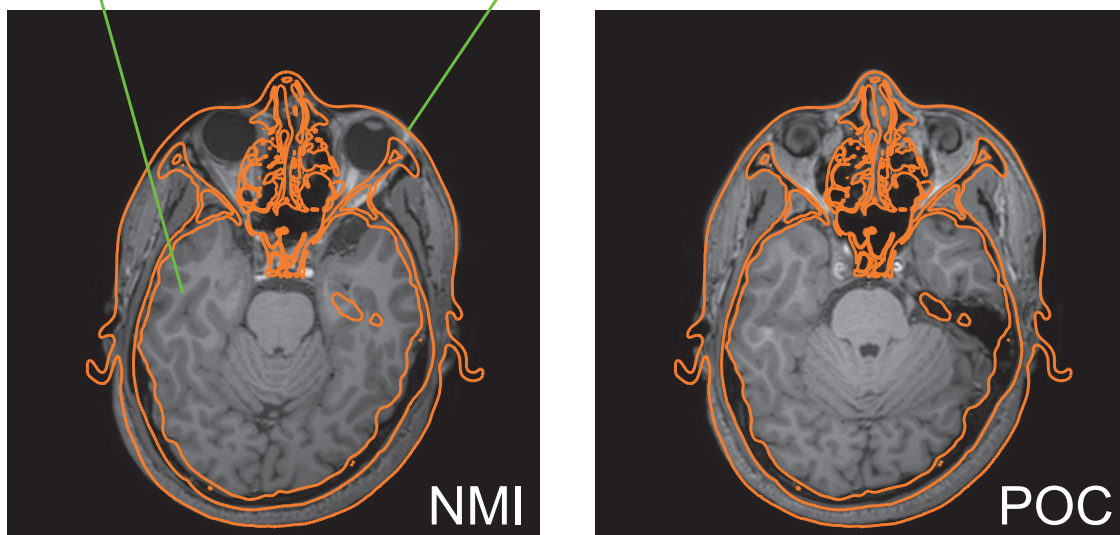
図 A.5 は，三つのボリュームデータセットのうち，代表として一つのセットについて片方のデータを  $30^\circ$  回転させた場合の位置合わせ結果をボリュームデータの断面図として可視化したものである．基準となるボリュームデータの断面図から抽出したエッジと，それに対して位置合わせを行ったデータの断面図を重ねて表示している．図 A.5 (a) は CT データ同士の位置合わせ結果であり，図 A.5 (b) は CT データと MRI データの位置合わせ結果である．これらの図からも，提案手法が従来手法に比べて大幅に高い位置合わせ精度を持っていることがわかる．

Registered CT data      Edge from reference CT data



(a)

Registered MRI data      Edge from reference CT data



(b)

図 A.5 位置合わせ結果 (  $30^\circ$  回転させた場合 ): (a) CT データと CT データの位置合わせ , (b) CT データと MRI データの位置合わせ

## Registered CT data    Edge from reference CT data

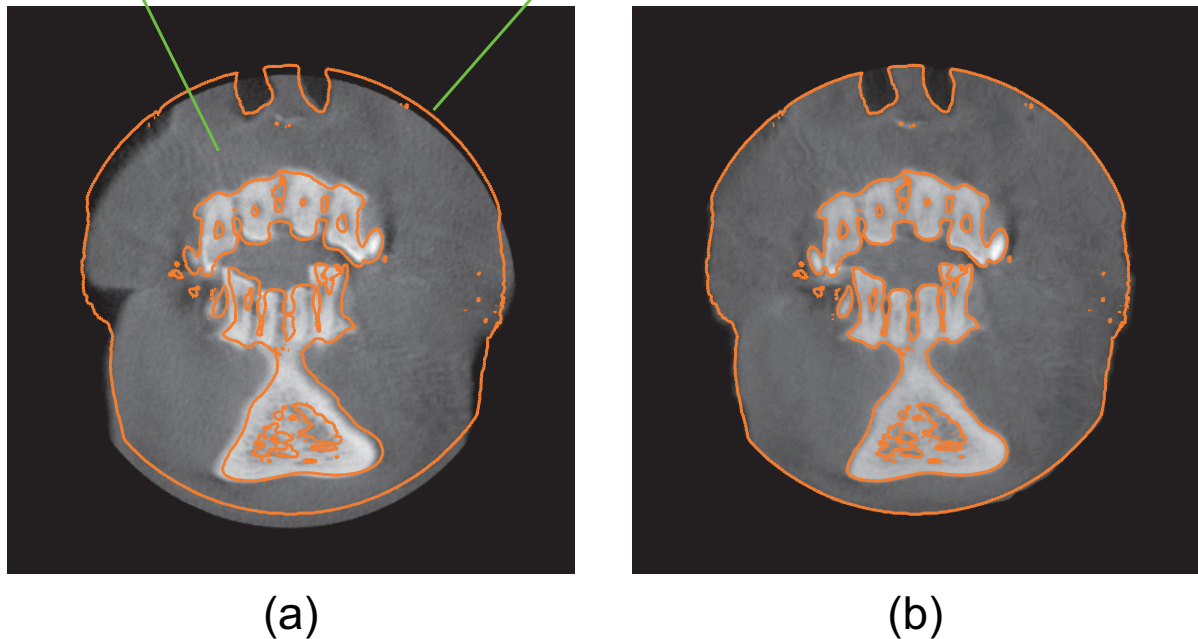


図 A.6 提案手法による非剛体位置合わせ (CT データ同士): (a) 剛体位置合わせ, (b) 非剛体位置合わせ

また、各データセットにおいて、 $-30^\circ$  から  $30^\circ$  まで計 7 回の位置合わせのそれぞれに要した計算時間の平均値を表 A.3 に示す。なお、各アルゴリズムの実装には MATLAB 7.4.0 を利用し、実験で使用した PC の仕様は、CPU: Xeon ( $3.0 \text{ GHz} \times 2$ )、メモリ: 16 GB、OS: CentOS 4.7 である。表 A.3 を見ると、非線形最適化を必要とせず、ポリウムデータ間の対応付けによって位置合わせを行う提案手法は、従来手法に比べて最大で約 95 % の計算時間削減を達成していることがわかる。

最後に、提案手法を用いて FFD による非剛体位置合わせを行った結果を図 A.6 に示す。二つのデータ間に非線形なひずみが生じている場合は、剛体位置合わせのみでは不十分であり、非剛体位置合わせが必要となる。A.4 に述べたように、位相限定相関法に基づくポリウムデータの対応付けは非剛体位置合わせにおいても大変効果的であり、図 A.6 に示すように剛体位置合わせでは補正できない局所的なひずみを高精度に補正することが可能である。

## A.6 むすび

ここでは、位相限定相関法に基づくボリウムデータの位置合わせ手法について述べた。位相限定相関関数を 3 次元に拡張することで、CT や MRI などから得られるボリウムデータのマッチングが可能となる。ここでは、3 次元 POC 関数を利用したボリウムデータの対応付け手法を提案し、得られた対応関係に基づいてボリウムデータの位置合わせを行う手法について述べた。3 次元 POC 関数を用いることでサブボクセル精度で二つのボリウムデータを対応付けることができ、得られた対応関係を元にして高精度にボリウムデータの位置合わせを行うことができる。提案手法は、撮影装置や撮影方法の違いに対してもロバストな位置合わせが可能であり、また、剛体位置合わせだけでなく非剛体位置合わせにも容易に拡張することができる。実際に CT や MRI から得られたボリウムデータを用いた実験を通して、提案手法によって非線形最適化などを利用する従来手法に比べて大幅な精度向上、計算時間削減が可能であること確認した。

## 参考文献

- [1] 土屋裕, 画像計測. 昭晃堂, 1994.
- [2] Q. Tian and M. N. Huhns, “Algorithms for subpixel registration,” *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, Vol. 35, pp. 220–233, Aug. 1986.
- [3] L. G. Brown, “A survey of image registration techniques,” *ACM Computing Surveys*, Vol. 24, No. 4, pp. 325–376, Dec. 1992.
- [4] B. Zitova and J. Flusser, “Image registration methods: a survey,” *Image and Vision Computing*, Vol. 21, No. 11, pp. 977–1000, Oct. 2003.
- [5] C. D. Kuglin and D. C. Hines, “The phase correlation image alignment method,” *Proc. Int. Conf. on Cybernetics and Society*, pp. 163–165, 1975.
- [6] Q. Chen, M. Defrise, and F. Deconinck, “Symmetric phase-only matched filtering of Fourier-Mellin transforms for image registration and recognition,” *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 16, No. 12, pp. 1156–1168, Dec. 1994.
- [7] G. A. Thomas, “Television motion measurement for DATV and other applications,” *BBC Research Department Report*, Sept. 1987.
- [8] H. Foroosh, J. B. Zerubia, and M. Berthod, “Extension of phase correlation to subpixel registration,” *IEEE Trans. on Image Processing*, Vol. 11, No. 3, pp. 188–200, Mar. 2002.
- [9] 青木孝文, 伊藤康一, 柴原琢磨, 長嶋聖, “位相限定相関法に基づく高精度マシンビジョン—ピクセル分解能の壁を越える画像センシング技術を目指して—,” *IEICE Fundamentals*

- Review*, Vol. 1, No. 1, pp. 30–40, July 2007.
- [10] 青木孝文, 伊藤康一, 本間尚文, “位相情報に基づく画像マッチング技術とその応用展開 –3D ビジョンからバイオメトリクスまで–,” 電子情報通信学会誌, Vol. 90, No. 8, pp. 680–685, Aug. 2007.
- [11] 宮澤一之, “位相限定相関法とその応用,” 映像情報メディア学会誌, Vol. 63, No. 7, pp. 935–938, June 2009.
- [12] 宮澤一之, 伊藤康一, 青木孝文, “位相限定相関法による高精度画像マッチング –人体の画像計測および医用画像処理への適用を例として–,” 画像ラボ, Jan. 2010.
- [13] K. Ito, H. Nakajima, K. Kobayashi, T. Aoki, and T. Higuchi, “A fingerprint matching algorithm using phase-only correlation,” *IEICE Trans. on Fundamentals*, Vol. E87-A, No. 3, pp. 682–691, Mar. 2004.
- [14] K. Ito, A. Nikaido, T. Aoki, E. Kosuge, R. Kawamata, and I. Kashima, “A dental radiograph recognition system using phase-only correlation for human identification,” *IEICE Trans. on Fundamentals*, Vol. E91-A, No. 1, pp. 298–305, Jan. 2008.
- [15] S. Iitsuka, K. Ito, and T. Aoki, “A practical palmprint recognition algorithm using phase information,” *Proc. Int. Conf. on Pattern Recognition*, No. WeBCT9.18, Dec. 2008.
- [16] K. Takita, T. Aoki, Y. Sasaki, T. Higuchi, and K. Kobayashi, “High-accuracy sub-pixel image registration based on phase-only correlation,” *IEICE Trans. on Fundamentals*, Vol. E86-A, No. 8, pp. 1925–1934, Aug. 2003.
- [17] S. Nagashima, T. Aoki, T. Higuchi, and K. Kobayashi, “A subpixel image matching technique using phase-only correlation,” *Proc. of Int. Symp. on Intelligent Signal Processing and Communications*, pp. 701–704, Dec. 2006.
- [18] 長嶋聖, 青木孝文, 常田るり子, “位相限定相関法に基づく電子顕微鏡画像の倍率推定アルゴリズムとその高精度化,” 映像情報メディア学会技術報告, Vol. 30, No. 33, pp. 41–44, June 2006.
- [19] K. Takita, M. A. Muquit, T. Aoki, and T. Higuchi, “A sub-pixel correspondence

- search technique for computer vision applications,” *IEICE Trans. on Fundamentals*, Vol. E87-A, No. 8, pp. 1913–1923, Aug. 2004.
- [20] M. A. Muquit, T. Shibahara, and T. Aoki, “A high-accuracy passive 3D measurement system using phase-based image matching,” *IEICE Trans. on Fundamentals*, Vol. E89-A, No. 3, pp. 686–697, Mar. 2006.
- [21] T. Shibahara, T. Aoki, H. Nakajima, and K. Kobayashi, “A high-accuracy stereo correspondence technique using 1D band-limited phase-only correlation,” *IEICE Electronics Express*, Vol. 5, No. 4, pp. 125–130, Feb. 2008.
- [22] 柴原琢磨, 沼徳仁, 長嶋聖, 青木孝文, 中島寛, 小林孝次, “一次元位相限定相関法に基づくステレオ画像の高精度サブピクセル対応付け手法,” 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. J91-D, No. 9, pp. 2343–2356, Sept. 2008.
- [23] 長嶋聖, 中島寛, 小林孝次, 宮澤一之, 柴原琢磨, 沼徳仁, 青木孝文, “1次元位相限定相関法に基づくステレオ画像の高性能対応付け手法,” 画像ラボ, Vol. 20, No. 3, pp. 58–63, Mar. 2009.
- [24] 沼徳仁, 伊藤康一, 青木孝文, 近藤敏志, “位相限定相関法を用いた超解像デインタレーシング,” 電子情報通信学会論文誌 A, Vol. J92-A, No. 8, pp. 529–539, Aug. 2009.
- [25] S. Nagashima, K. Ito, T. Aoki, H. Ishii, and K. Kobayashi, “High-accuracy estimation of image rotation using 1D phase-only correlation,” *IEICE Trans. on Fundamentals*, Vol. E92-A, No. 1, pp. 235–243, Jan. 2009.
- [26] 長嶋聖, 青木孝文, 樋口龍雄, “位相情報を用いた高精度画像レジストレーション手法に関する実験的検討,” 電気関係学会東北支部連合大会講演論文集, No. 2H10, p. 286, Aug. 2004.
- [27] 越後富夫, 岩井儀雄, 森島繁生, 鷲見和彦, 井岡幹博, 八木康史, 人画像処理. オーム社, 2007.
- [28] A. Jain, R. Bolle, and S. Pankanti, *Biometrics: Personal Identification in a Networked Society*. Norwell, MA: Kluwer, 1999.
- [29] A. Jain, A. Ross, and S. Prabhakar, “An introduction to biometric recognition,”



- IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology*, Vol. 14, No. 1, pp. 4–20, Jan. 2004.
- [30] 瀬戸洋一, バイオメトリックセキュリティ入門. ソフト・リサーチ・センター, 2004.
- [31] J. Wayman, A. Jain, D. Maltoni, and D. Maio, *Biometric Systems*. Springer, 2005.
- [32] 社団法人日本自動認識システム協会, よくわかるバイオメトリクスの基礎. オーム社, 2005.
- [33] J. Daugman, “High confidence visual recognition of persons by a test of statistical independence,” *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 15, No. 11, pp. 1148–1161, Nov. 1993.
- [34] W. Boles and B. Boashash, “A human identification technique using images of the iris and wavelet transform,” *IEEE Trans. on Signal Processing*, Vol. 46, No. 4, pp. 1185–1188, Apr. 1998.
- [35] C. Sanchez-Avila, R. Sanchez-Reillo, and D. de Martin-Roche, “Iris-based biometric recognition using dyadic wavelet transform,” *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, Vol. 17, No. 10, pp. 3–6, Oct. 2002.
- [36] S. Lim, K. Lee, O. Byeon, and T. Kim, “Efficient iris recognition through improvement of feature vector and classifier,” *ETRI Journal*, Vol. 23, No. 2, pp. 61–70, June 2001.
- [37] L. Ma, T. Tan, Y. Wang, and D. Zhang, “Efficient iris recognition by characterizing key local variations,” *IEEE Trans. on Image Processing*, Vol. 13, No. 6, pp. 739–750, June 2004.
- [38] R. Wildes, “Iris recognition: An emerging biometric technology,” *Proc. IEEE*, Vol. 85, No. 9, pp. 1348–1363, Sept. 1997.
- [39] B. V. K. Vijaya Kumar, C. Xie, and J. Thornton, “Iris verification using correlation filters,” *Proc. Int. Conf. on Audio- and Video-based Biometric Person Authentication*, pp. 697–705, 2003.
- [40] Z. Sun, T. Tan, and X. Qiu, “Graph matching iris image blocks with local binary

- pattern,” *Lecture Notes in Computer Science (ICB2006)*, Vol. 3832, pp. 366–372, Jan. 2006.
- [41] K. Miyazawa, K. Ito, T. Aoki, K. Kobayashi, and H. Nakajima, “An efficient iris recognition algorithm using phase-based image matching,” *Proc. Int. Conf. on Image Processing*, Vol. II, pp. 49–52, Sept. 2005.
- [42] K. Miyazawa, K. Ito, T. Aoki, K. Kobayashi, and H. Nakajima, “A phase-based iris recognition algorithm,” *Lecture Notes in Computer Science (ICB2006)*, Vol. 3832, pp. 356–365, Jan. 2006.
- [43] K. Miyazawa, K. Ito, T. Aoki, K. Kobayashi, and H. Nakajima, “An iris recognition algorithm using phase-based image matching,” *Face Recognition Grand Challenge and Iris Challenge Evaluation Workshop*, Mar. 2006.
- [44] 宮澤一之, 伊藤康一, 青木孝文, 小林孝次, 中島寛, “位相限定相関法に基づく虹彩認証アルゴリズム,” 映像情報メディア学会技術報告, Vol. 30, No. 33, pp. 45–48, June 2006.
- [45] K. Miyazawa, K. Ito, T. Aoki, K. Kobayashi, and H. Nakajima, “An effective approach for iris recognition using phase-based image matching,” *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 30, No. 10, pp. 1741–1756, Oct. 2008.
- [46] 宮澤一之, 伊藤康一, 青木孝文, 小林孝次, “位相限定相関法に基づく虹彩認証アルゴリズムとその高性能化,” 画像ラボ, Vol. 19, No. 10, pp. 5–10, Oct. 2008.
- [47] K. Miyazawa, K. Ito, T. Aoki, K. Kobayashi, and A. Katsumata, “An iris recognition system using phase-based image matching,” *Proc. Int. Conf. on Image Processing*, pp. 325–328, Oct. 2006.
- [48] 宮澤一之, 伊藤康一, 青木孝文, 小林孝次, 中島寛, “位相限定相関法に基づく虹彩認証アルゴリズムの実装に向けた検討,” 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 106, No. 374, pp. 45–50, Nov. 2006.
- [49] K. Miyazawa, K. Ito, T. Aoki, K. Kobayashi, and H. Nakajima, “An implementation-oriented iris recognition algorithm using phase-based image matching,” *Proc. Int.*

- Symp. on Intelligent Signal Processing and Communication Systems*, pp. 231–234, Dec. 2006.
- [50] 持丸正明, 河内まき子, 人体を測る – 寸法・形状・運動 –. 東京電機大学出版局, 2006.
- [51] P. Treleaven, “Sizing us up,” *IEEE Spectrum*, Vol. 41, No. 4, pp. 28–31, Apr. 2004.
- [52] P. Treleaven and J. Wells, “3D body scanning and healthcare applications,” *Computer*, Vol. 40, No. 7, pp. 28–34, July 2007.
- [53] N. D’Apuzzo, “Recent advances in 3D full body scanning with applications to fashion and apparel,” *Optical 3-D Measurement Techniques*, July 2009.
- [54] M. H. Demers, J. D. Hurley, and R. C. Wulpern, “Three-dimensional surface capture for body measurement using projected sinusoidal patterns,” *Proc. SPIE*, Vol. 3023, pp. 13–25, Mar. 1997.
- [55] C. Horiguchi, “BL (Body Line) scanner: The development of a new 3D measurement and reconstruction system,” *Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 32, pp. 421–429, 1998.
- [56] 吉澤徹, “光によるヒトの 3 次元形状計測,” 計測と制御, Vol. 39, No. 4, pp. 267–272, Apr. 2000.
- [57] C. Y. Yu, Y. H. Lo, and W. K. Chiou, “The 3D scanner for measuring body surface area: A simplified calculation in the Chinese adult,” *Applied Ergonomics*, pp. 273–278, May 2003.
- [58] 船富卓哉, 飯山将晃, 角所考, 美濃導彦, “身体動揺を考慮した人体部位の形状計測法,” 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. J88-D-II, No. 8, pp. 1530–1538, Aug. 2005.
- [59] 山内航一郎, 柴田進, 佐藤幸男, “多視点距離画像を用いた人体の三次元形状計測,” 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. J88-D-II, No. 8, pp. 1564–1572, Aug. 2005.
- [60] Bodyline Scanner, 浜松ホトニクス,  
[http://jp.hamamatsu.com/products/opto-meas/0002/pd369/c9036/index\\_ja.html](http://jp.hamamatsu.com/products/opto-meas/0002/pd369/c9036/index_ja.html).
- [61] NX-16, [TC]<sup>2</sup>, [http://www.tc2.com/index\\_3dbodyscan.html](http://www.tc2.com/index_3dbodyscan.html).
- [62] VITUS<sup>smart</sup> LC, VITRONIC,

- <http://www.vitronic.de/en/bodyscannen/complete-body-scanning/>.
- [63] WBX, Cyberware, <http://www.cyberware.com/products/scanners/wbx.html>.
- [64] 宮澤一之, 青木孝文, “Eye-in-hand 構造に基づく受動型 3 次元人体形状計測システム,” 画像の認識・理解シンポジウム論文集, pp. 1598–1603, July 2008.
- [65] K. Miyazawa and T. Aoki, “A robot-based 3D body scanning system using passive stereo vision,” *Proc. Int. Conf. on Image Processing*, pp. 305–308, Oct. 2008.
- [66] L. Flom and A. Safir, “Iris recognition system,” Feb. 1987.
- [67] D. Maltoni, D. Maio, A. K. Jain, and S. Prabhakar, *Handbook of Fingerprint Recognition*. Springer, 2003.
- [68] 井口征士, 佐藤宏介, 三次元画像計測. 昭晃堂, 1990.
- [69] O. Faugeras, *Three-dimensional computer vision: A geometric viewpoint*. MIT press, 1993.
- [70] 徐剛, 辻三郎, 3 次元ビジョン. 共立出版, 1998.
- [71] R. Hartley and A. Zisserman, *Multiple view geometry in computer vision*. Cambridge University Press, 2003.
- [72] 奥富正敏 (編集), デジタル画像処理. CG-ARTS 協会, 2004.
- [73] Z. Zhang, “A flexible new technique for camera calibration,” *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 22, No. 11, pp. 1330–1334, Nov. 2000.
- [74] Microsoft Easy Camera Calibration Tool,  
<http://research.microsoft.com/en-us/downloads/7e9de40f-06db-452c-a0f2-4fabb4f20f52/>.
- [75] Camera Calibration Toolbox for Matlab,  
[http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib\\_doc/](http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/).
- [76] V. Vezhnevets and A. Velizhev, “GML C++ Camera Calibration Toolbox,”  
<http://research.graphicon.ru/calibration/gml-c++-camera-calibration-toolbox.html>, 2005.
- [77] M. Shimizu and M. Okutomi, “Sub-pixel estimation error cancellation on area-based matching,” *Int. J. of Computer Vision*, Vol. 63, No. 3, pp. 207–224, July 2005.

- [78] A. V. Oppenheim and J. S. LIM, “The importance of phase in signals,” *Proc. the IEEE*, Vol. 69, No. 5, pp. 529–541, May 1981.
- [79] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, and B. P. Flannery, *Numerical Recipes in C*. Cambridge University Press, 1988.
- [80] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, *Digital Image Processing, 2nd Edition*. Prentice-Hall, Inc., 2002.
- [81] B. V. K. Vijaya Kumar, A. Mahalanobis, and R. Juday, *Correlation Pattern Recognition*. Cambridge University Press, 2005.
- [82] CASIA iris image database, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, <http://www.sinobiometrics.com/>.
- [83] Iris Challenge Evaluation (ICE), National Institute of Standards and Technology, <http://iris.nist.gov/ice/>.
- [84] L. Masek and P. Kovesi, “Matlab source code for a biometric identification system based on iris patterns,” *The School of Computer Science and Software Engineering, The University of Western Australia*, 2003.
- [85] ICE 2005 results, National Institute of Standards and Technology, [http://iris.nist.gov/ICE/ICE\\_2005\\_Results\\_30March2006.pdf](http://iris.nist.gov/ICE/ICE_2005_Results_30March2006.pdf)
- [86] BM-ET200, Panasonic, <http://panasonic.biz/security/iris/et200/index.html>.
- [87] Products using phase-based image matching, Graduate School of Information Sciences, Tohoku University, <http://www.aoki.ecei.tohoku.ac.jp/research/poc.html>.
- [88] T. Kanade and M. Okutomi, “A stereo matching algorithm with an adaptive window: theory and experiment,” *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 16, No. 9, pp. 920–932, Sept. 1994.
- [89] Intel 64 and IA-32 Architectures Optimization Reference Manual, <http://www.intel.com/products/processor/manuals/>.
- [90] Y. C. Shiu and S. Ahmad, “Calibration of wrist-mounted robotic sensors by solving homogeneous transform equations of the form  $AX=XB$ ,” *IEEE Trans. on Robotics*

- and Automation*, Vol. 5, No. 1, pp. 16–29, Feb. 1989.
- [91] R. Horaud and F. Dornaika, “Hand-eye calibration,” *Int. J. of Robotics Research*, Vol. 14, No. 3, No. 3, pp. 195–210, 1995.
  - [92] F. Dornaika and R. Horaud, “Simultaneous robot-world and hand-eye calibration,” *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 14, No. 4, pp. 617–622, Aug. 1998.
  - [93] OpenCV, <http://opencv.willowgarage.com/wiki/Welcome>.
  - [94] P. Viola and M. Jones, “Rapid object detection using a boosted cascade of simple features,” *Proc. IEEE Computer Society Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, Vol. 1, pp. 511–518, Dec. 2001.
  - [95] 徐剛, 写真から作る 3 次元 CG –イメージ・ベースド・モデリング&レンダリング–. 近代科学社, 2001.
  - [96] P. J. Besl and N. D. McKay, “A method for registration of 3-D shapes,” *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 14, No. 2, pp. 239–256, Feb. 1992.
  - [97] Z. Zhang, “Iterative point matching for registration of free-form curves,” *Technical Report RR-1658, INRIA-Sophia Antipolis, Valbonne Cedex, France*, 1992.
  - [98] S. Rusinkiewicz and M. Levoy, “Efficient variants of the ICP algorithm,” *Proc. Int. Conf. on 3-D Digital Imaging and Modeling*, pp. 145–152, May 2001.
  - [99] B. K. P. Horn, “Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions,” *J. of the Optical Society of America A*, Vol. 4, No. 4, pp. 629–642, Apr. 1987.
  - [100] K. S. Arun, T. S. Huang, and S. D. Blostein, “Least-squares fitting of two 3-D point sets,” *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 9, No. 5, pp. 698–700, Sept. 1987.
  - [101] R. Benjemaa and F. Schmitt, “A solution for the registration of multiple 3D point sets using unit quaternions,” *Proc. Euro. Conf. on Computer Vision*, Vol. II, pp. 34–50, June 1998.
  - [102] R. M. Rangayyan, *Biomedical Image Analysis*. CRC press, 2004.

- [103] 山形仁 (編集), 医用機器 II. コロナ社, 2006.
- [104] R. M. Koch, M. H. Gross, F. R. Carls, D. F. von Buren, G. Fankhauser, and Y. I. H. Parish, “Simulating facial surgery using finite element models,” *In Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH*, pp. 421–428, Aug. 1996.
- [105] E. Keeve, S. Girod, R. Kikinis, and B. Girod, “Deformable modeling of facial tissue for craniofacial surgery simulation,” *Computer Aided Surgery*, Vol. 3, pp. 228–238, 1998.
- [106] M. Meehan, M. Teschner, and S. Girod, “Three-dimensional simulation and prediction of craniofacial surgery,” *Orthod Craniofacial Res* 6, pp. 102–107, 2003.
- [107] A. F. Ayoub, Y. Xiao, B. Khambay, J. P. Siebert, and D. Hadley, “Towards building a photo-realistic virtual human face for craniomaxillofacial diagnosis and treatment planning,” *Int. J. of Oral & Maxillofacial Surgery*, Vol. 36, No. 5, pp. 423–428, May 2007.
- [108] A. M. Haider and T. Kaneko, “Automatic reconstruction of 3D human face from CT and color photographs,” *IEICE Trans. on Information and Systems*, Vol. E82-D, No. 9, pp. 1287–1293, Sept. 1999.
- [109] J. Xia, H. S. Ip. Horace, N. Samman, H. T. F. Wong, J. Gateno, D. Wang, R. W. K. Yeung, C. S. B. Kot, and H. Tideman, “Three-dimensional virtual-reality surgical planning and soft-tissue prediction for orthognathic surgery,” *IEEE Trans. on Information Technology in Biomedicine*, Vol. 5, No. 2, pp. 97–107, June 2001.
- [110] S. Dogan, “3D reconstruction and evaluation of tissues by using CT, MR slices and digital images,” *Proc. of XXth ISPRS Congress*, Vol. XXXV, pp. 323–327, July 2004.
- [111] 宮澤一之, 野畑幸里, 青木孝文, “3 次元医用データとカメラ画像の融合手法,” 画像の認識・理解シンポジウム論文集, pp. 1607–1614, July 2009.
- [112] W. E. Lorensen and H. E. Cline, “Marching cubes: A high resolution 3D surface

- construction algorithm,” *In Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH*, Vol. 21, No. 4, pp. 163–169, July 1987.
- [113] P. Perez, M. Gangnet, and A. Blake, “Poisson image editing,” *In Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH*, Vol. 22, No. 3, No. 3, pp. 313–318, 2003.
- [114] DICOM Homepage, <http://medical.nema.org/>.
- [115] 野畑幸里, 宮澤一之, 青木孝文, “医用画像ビューア OsiriX の機能拡張による 3 次元医用データとカメラ画像の融合表示,” *情報科学技術フォーラム*, No. G-004, pp. 571–576, Sept. 2009.
- [116] OsiriX Imaging Software, <http://www.osirix-viewer.com/>.
- [117] 田島裕一郎, 宮澤一之, 青木孝文, 勝亦敦, 小林孝次, “3 次元位相限定相関法に基づく高精度ボリュームレジストレーション,” *情報科学技術フォーラム*, No. RG-001, pp. 95–102, Sept. 2009.
- [118] K. Miyazawa, Y. Tajima, K. Ito, T. Aoki, A. Katsumata, and K. Kobayashi, “A novel approach for volume registration using 3D phase-only correlation,” *Radiological Society of North America*, p. 1070, Nov. 2009.
- [119] 加藤逸夫 (監修), 松尾汎 (編集), *リンパ浮腫 診療の実際 —現状と展望*. 文光堂, 2003.
- [120] 細川賀乃子, 近藤和泉, 岩田学, “リンパ浮腫に対するリハビリテーション・アプローチ,” *リハビリテーション医学*, Vol. 43, No. 1, No. 1, pp. 51–62, 2006.
- [121] 小島肇, 阿波井美帆, 吉川恵美子, 竹村雅裕, 林謙司, 柳田俊次, 島田孝, “周径測定の信頼性,” *理学療法学*, Vol. 23, p. 282, 1996.
- [122] 中村隆夫, 合田典子, 白井喜代子, 楠原俊昌, 山本尚武, “浮腫評価のための体肢容積計の開発,” *岡山大学医学部保健学科紀要*, Vol. 14, pp. 31–35, 2003.
- [123] Perometer 400T, Juzo,  
[http://www.juzousa.com/product.asp?menu1=Perometer&menu2=Stationary&product\\_class=PER&group\\_model=400T](http://www.juzousa.com/product.asp?menu1=Perometer&menu2=Stationary&product_class=PER&group_model=400T).
- [124] 香川敏昌, 細束正一, 松浦良彦, 大恵俊一郎, 小川洋司, “非接触人体形状計測装置の開



- 発,” 徳島県立工業技術センター研究報告, Vol. 17, Nov. 2008.
- [125] 荒屋信二, 明解 3 次元コンピュータグラフィックス. 共立出版, 2003.
- [126] M. A. Fischler and R. C. Bolles, “Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography,” *Comm. of the ACM*, Vol. 24, No. 6, pp. 381–395, June 1981.
- [127] 三浦曜, 望月一正, CAD・CG 技術者のための実践 NURBS. 工業調査会, 2001.
- [128] C. R. Maurer Jr., J. M. Fitzpatrick, M. Y. Wang, R. L. Galloeay Jr., R. J. Maciunas, and G. S. Allen, “Registration of head volume images using implantable fiducial markers,” *IEEE Trans. on Medical Imaging*, Vol. 16, No. 4, pp. 447–462, Aug. 1997.
- [129] F. Maes, A. Collignon, D. Vandermeulen, G. Marchal, and P. Suetens, “Multi-modality image registration by maximization of mutual information,” *IEEE Trans. on Medical Imaging*, Vol. 16, No. 2, pp. 187–198, Apr. 1997.
- [130] C. Studholme, D. L. G. Hill, and D. J. Hawkes, “An overlap invariant entropy measure of 3D medical image alignment,” *Pattern Recognition*, Vol. 32, No. 1, pp. 71–86, Jan. 1999.
- [131] D. Rueckert, L. I. Sonoda, C. Hayes, D. L. G. Hill, M. O. Leach, and D. J. Hawkes, “Nonrigid registration using free-form deformation: Application to breast MR images,” *IEEE Trans. on Medical Imaging*, Vol. 18, No. 8, pp. 712–721, Aug. 1999.
- [132] A. Roche, X. Pennec, G. Malandain, and N. Ayache, “Rigid registration of 3-D ultrasound with MR images: A new approach combining intensity and gradient information,” *IEEE Trans. on Medical Imaging*, Vol. 20, No. 10, pp. 1038–1049, Oct. 2001.
- [133] S. Lee, G. Wolberg, K. Y. Chwa, and S. Y. Shin, “Image metamorphosis with scattered feature constraints,” *IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 2, No. 4, pp. 337–354, Dec. 1996.
- [134] S. Lee, G. Wolberg, and S. Y. Shin, “Scattered data interpolation with multilevel B-splines,” *IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 3, No. 3,

pp. 228–244, July 1997.

- [135] D. R. Forsey and R. H. Bartels, “Hierarchical B-spline refinement,” *ACM Trans. on Computer Graphics*, Vol. 22, No. 4, pp. 205–212, Aug. 1988.



# 謝辞

本論文は、著者が東北大学 大学院情報科学研究科 情報基礎科学専攻 計算機構論分野（青木研究室）において行った研究を取りまとめたものであります。本研究を推し進めるにあたり、多くの方々からご協力とご助言をいただきました。

恩師 青木孝文教授には、研究に対する懇切なるご指導と終始変わらぬ励ましをいただきました。研究だけでなく、何事に対しても情熱的に取り組む先生のご姿勢から、非常に多くのことを学ばせていただきました。学部4年次から博士後期課程修了まで、6年間に渡り先生のもとで研究を行えたことは、私にとって大変な幸運であり、今後の人生の大きな糧になると確信しております。ここに改めて、深く感謝の意を表します。

本論文をまとめるにあたり、川又政征教授ならびに篠原歩教授より、それぞれのご専門の立場から有意義なご意見を賜りました。ここに深く感謝いたします。

青木研究室の助教である伊藤康一博士には、学部4年次より研究全般に関する直接的なご指導と活発なご討論をいただきました。深くお礼申し上げます。

株式会社山武の小林孝次氏、勝亦敦氏、中島寛氏には、共同研究を通して位相限定相関法および虹彩認証に関する活発なご討論とご支援をいただきました。学部4年次という早い段階から皆様との共同研究に参加できたことが、今の私の基盤を作り、支えとなっています。ここに改めて深く感謝いたします。

代官山パークサイドクリニックの高村宗俊氏には、画像診断に関して臨床の立場から活発なご討論とご意見をいただきました。紹介していただいた研究テーマや提供していただいたデータのおかげで、大きく研究が進展することとなりました。深く感謝いたします。また、順天堂大学浦安病院の堤佐斗志先生には、3次元医用データとカメラ画像の融合およびボリューム

データの位置合わせについて、臨床への応用を目指してご協力をいただきました。ここに改めてお礼申し上げます。

東北大学病院の古沢義人先生には、浮腫治療に関して臨床の立場から有意義なご議論とご意見をいただきました。人体形状計測の応用の一つとして浮腫治療の効果計測というテーマをご紹介いただき、また、本研究で開発した計測システムの臨床利用に向けて多大なるご協力をいただきました。ここに改めて深く感謝いたします。

コニカミノルタテクノロジーセンター株式会社の墨友博則氏には、共同研究を通してステレオカメラを用いた3次元計測に関する活発なご討論とご助言をいただきました。ここに改めてお礼申し上げます。

凸版印刷株式会社の運天弘樹博士には、共同研究を通して多視点からの3次元計測について有益なご議論をいただきました。ここにお礼申し上げます。

日本電信電話株式会社の橋本勝博士には、マルチバンドカメラを用いた色再現という非常に興味深いトピックについてご教授いただきました。ここに改めてお礼申し上げます。

株式会社アドバンテストの山口隆弘博士、出川勝彦博士には、共同研究を通して次世代の半導体試験に関する技術について活発なご議論をいただきました。ここに感謝いたします。

株式会社ルネサステクノロジの中島雅美博士には、マトリクス構造超並列プロセッサへの位相限定相関法の実装について、有意義なご議論とご支援をいただきました。また、3週間のインターンシップとして北伊丹事業所で開発に携われたことは、私にとって大変貴重な経験となりました。ここに感謝いたします。

柴原琢磨博士（現 株式会社日立製作所）には、位相限定相関法に基づく受動型3次元計測について、有益なご議論とご指導をいただきました。ここに改めて深く感謝いたします。また、沼徳仁博士（現 株式会社ナックイメージテクノロジー）には、研究全般を通して多大なるご助力をいただきました。深く感謝いたします。

Jeffrey Bonar Fernando 氏（現 パナソニック株式会社）、青木研究室の高橋徹氏、飯塚智氏、野畑幸里氏、栗山貴好氏、田島裕一郎氏、Fajar Mega Pratama 氏、酒井修二氏、三浦衛氏には、本研究に関する様々なご意見やご協力をいただきました。ここに改めて深くお礼申し上げます。

日頃の研究室生活において様々な面でご協力いただいた本間尚文准教授をはじめとする研究室諸氏に心よりお礼申し上げます。

このように、本研究を行うにあたり、多くの方々からご協力とご助言をいただきました。私一人の力では、到底このような形で研究を取りまとめ、論文として著すことはできませんでした。諸氏に重ねて厚くお礼申し上げます。

最後に、博士後期課程に進学し研究続けることに理解を示し、終始惜しみない励ましと援助を続けてくれた両親に感謝の意をあらわし、本論文を結びます。

2010 年 1 月 20 日